

# Eine Analogie zwischen Mechanik, Wärmelehre und Elektrizitätslehre

*Friedrich Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe*

## **Zusammenfassung**

Analogien machen die Lehre der Naturwissenschaft kürzer und klarer. Es wird eine Analogie diskutiert, bei der sich die vier naturwissenschaftlichen Bereiche Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre (oder Chemie) entsprechen. Traditionell werden diese vier Gebiete auf recht verschiedene Art dargestellt, und die Analogie wird nicht genutzt. Wenn man alle vier Teildisziplinen so darstellt, wie man es gewöhnlich mit der Elektrizitätslehre tut, so gewinnen die drei anderen Bereiche, nämlich Mechanik, Wärmelehre und Stofflehre an Klarheit. Voraussetzung dafür, dass man die Analogie überhaupt nutzen kann, ist aber, dass man zwei Größen behandelt, die normalerweise im Unterricht nicht oder nur wenig vorkommen, nämlich in der Wärmelehre die Entropie und in der Stofflehre das chemische Potenzial.

## **1. Analogien in der Naturwissenschaft**

Wir sprechen in der Naturwissenschaft von einer Analogie zwischen zwei Themenbereichen, wenn diese durch dieselben mathematischen Strukturen beschrieben werden. Ein bekanntes Beispiel sind Schwingungserscheinungen. Es gibt Schwingungen der verschiedensten Art, die man durch denselben Differenzialgleichungstyp beschreiben kann.

Zu jeder Analogie lässt sich eine Übersetzungstabelle anlegen, eine Art zweisprachiges Wörterbuch. Einer physikalischen Größe in der einen Spalte der Tabelle entspricht eine andere Größe in der anderen Spalte und einer Beziehung zwischen Größen der einen Spalte entspricht eine Beziehung zwischen Größen der anderen Spalte. Außer Größen und Gleichungen kann man noch andere Begriffe in das Wörterbuch eintragen: Namen von physikalischen Erscheinungen, von Teilchen, von Geräten usw.

Es gibt keine Vorschriften darüber wie weit eine Analogie zu gehen hat. In manchen Fällen ist die Übereinstimmung gering, die Tabelle hat nur wenige Einträge. In anderen Fällen ist die Übereinstimmung groß, und es gibt es viele Einträge. Es gibt auch keine Vorschrift darüber, welcher mathematischen Natur die eingetragenen Größen sein müssten. So kann einem Skalar in der einen Spalte ein Vektor, ein Tensor oder ein Differenzialoperator in der anderen gegenüberstehen. Bei der bekannten Analogie zwischen elektrischem und magnetischem Feld entspricht der vektoriellen elektrischen Feldstärke  $\mathbf{E}$  die vektorielle magnetische Induktion  $\mathbf{B}$ , dem skalaren elektrischen Potenzial  $\varphi$  das magnetische Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$  und der skalaren Ladungsdichte  $\rho$  die vektorielle elektrische Stromdichte  $\mathbf{j}$ . Bei der Analogie zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik entsprechen den Variablen der klassischen Mechanik die quantenmechanischen Operatoren.

Hier einige weitere Beispiele von Analogien:

1. Allein innerhalb der Elektrodynamik gibt es drei verschiedene Analogien zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen [1].
2. Transportvorgänge können auf analoge Art beschrieben werden: Wärmeleitung, Diffusion und Impulstransport befolgen analoge Gleichungen [2].
3. Die Theorien von Licht und Schall sind analog zueinander, und zwar nicht nur die Wellentheorien, sondern auch die Strahlentheorien und die entsprechenden Quantentheorien. Der elektromagnetischen Lichtwelle entspricht die mechanische Schallwelle. Den Feldstärken  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  entsprechen bei der Schallwelle Druck und Geschwindigkeit. Der elektrischen Antenne entspricht etwa die Orgelpfeife, den Photonen entsprechen die Phononen.
4. In der Teilchenphysik sind Analogien ein fundamentales Ordnungsprinzip. Dabei entsprechen sich die vier Wechselwirkungen: die elektromagnetische, die starke, die schwache und die gravitative. In den supersymmetrischen Theorien entspricht jedem Fermion ein Boson und jedem Boson ein Fermion.

<b>Mechanik</b>	Impuls $p$	Geschwindigkeit $v$	Impulsstrom (Kraft) $F$
<b>Elektrizitätslehre</b>	elektrische Ladung $Q$	elektrisches Potenzial $\varphi$	elektrischer Strom $I$
<b>Wärmelehre</b>	Entropie $S$	absolute Temperatur $T$	Entropiestrom $I_S$
<b>Stofflehre</b>	Stoffmenge $n$	chemisches Potenzial $\mu$	Stoffstrom $I_n$

Tabelle 1: Die wichtigsten Größen der Analogie

Die beiden (oder mehr) Bereiche der Naturwissenschaft, die über eine Analogie zusammenhängen, wurden oft unabhängig voneinander entdeckt und bearbeitet, gewöhnlich von verschiedenen Personen und zu verschiedenen Zeiten. Oft erkannte man den Zusammenhang erst nachträglich. So waren Elektrizität und Magnetismus schon recht weit entwickelt, als Faraday die Übereinstimmung zwischen den beiden Erscheinungen entdeckte.

Es gibt auch Fälle, wo das Zusammenführen von zwei Analogie-Kandidaten noch nicht stattgefunden hat, und man kann vermuten, dass das Vereinfachungspotenzial durch noch nicht entdeckte Analogien noch recht groß ist.

## 2. Die Analogie zwischen Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre

Bei der Analogie, die hier vorgestellt werden soll, entsprechen sich die vier naturwissenschaftlichen Gebiete Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre und Stofflehre. (Wir haben absichtlich nicht die Bezeichnungen Thermodynamik, Elektrodynamik und Chemie verwendet, denn diese drei Gebiete umfassen mehr als nur die reine Wärme-, Elektrizitäts- bzw. Stofflehre.) Diese Analogie kam nicht mit einem Paukenschlag, sondern eher unauffällig in die Physik. Man begegnet ihr mal hier und mal dort, und meist ohne dass ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass es sich um eine Analogie handelt. Obwohl es eine Analogie zwischen vier Bereichen ist (also einem viersprachigen Wörterbuch entsprechend), findet man manchmal nur zwei oder drei Partner erwähnt. Besonders die Analogie zwischen Mechanik und Elektrizitätslehre ist bei den Ingenieuren sehr beliebt, und es gibt eine eigene Fachliteratur [3] und eigene Vorlesungen dazu. Alle vier Partner trifft man manchmal an in Lehrbüchern der Thermodynamik irreversibler Prozesse [4]. Da dieses Gebiet als schwierig gilt und daher in einer typischen Grundvorlesung der Hochschule kaum angesprochen wird, ist die Analogie nie zum Standardwissen von Physikern und Physiklehrern geworden. Eine Elementarisierung für die Schule, die leicht möglich ist, hat zunächst nicht stattgefunden. Ein Buch, das die Analogie auf dem Niveau einer Kursvorlesung darstellt, ist die „Energie und Entropie“ von Falk und Ruppel [5].

Tabelle 1 zeigt den Anfang des entsprechenden Wörterbuchs, nämlich einige der zueinander analogen Größen. Zunächst, Spalte 2, entsprechen sich die extensiven Größen Impuls  $p$ , elektrische Ladung  $Q$ , Entropie  $S$  und Stoffmenge  $n$ . Zu jeder dieser extensiven Größen gehört eine so genannte energie-konjugierte intensive Größe, Spalte 3: die Geschwindigkeit  $v$ , das elektrische Potenzial  $\varphi$ , die absolute Temperatur  $T$  bzw. das chemische Potenzial  $\mu$ . (Das Produkt aus extensiver und konjugierter intensiver Größe hat die Dimension der Energie.) Zu jeder extensiven Größe lässt sich ein Strom erklären, Spalte 4: der Impulsstrom  $F$  (= die Kraft), der Entropiestrom  $I_S$ , der elektrische Strom  $I$  und der Stoffstrom  $I_n$ . Außerdem entsprechen sich Widerstände, Kapazitäten und noch andere Größen.

Auf die Beziehungen zwischen diesen Größen und weitere Auswirkungen der Analogie kommen wir in Abschnitt 5 zu sprechen.

## 3. Die gemeinsamen Anschauungen in Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre

Da sich die vier analogen Gebiete historisch unabhängig voneinander entwickelt haben, haben sich in ihnen sehr unterschiedliche Anschauungen und Modelle herausgebildet. Das hat dazu geführt, dass die Analogie zunächst nur schwer zu erkennen war. So treten uns in der traditionellen Lehre die vier extensiven Größen auf recht unterschiedliche Art entgegen: Den Impuls lernen wir kennen als Abkürzung für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit und als praktische Invariante bei Stoßprozessen. Die elektrische Ladung ist ein Maß für die Menge von etwas, das man sich als eine Art Fluidum vorstellt, und das auf elektrisch geladenen Körpern sitzt. Von der Entropie bildet man sich nur über die mikroskopisch-statistische Deutung eine Anschauung. Die Stoffmenge schließlich scheint nichts anderes zu sein als ein Maß für die Zahl der elementaren Bausteine.

So verschieden wie diese Deutungen der extensiven Größen sind auch die der intensiven Größen, der Ströme, der Beziehungen zwischen den Größen und der durch sie beschriebenen Vorgänge. Es liegt nun auf der Hand, die Beschreibung der vier Gebiete so zu wählen, dass die Analogie deutlich wird. Dadurch wird die Physik einheitlicher und übersichtlicher.

Um die Analogie zur Wirkung kommen zu lassen, kann man auf verschiedene Arten vorgehen. Man lässt zum Beispiel die Mechanik wie sie ist und verändert die anderen drei Gebiete so, dass sie in ihrer Struktur der Mechanik entsprechen. Was dabei herauskommt, ist allerdings so abstoßend, dass man schnell davon ablassen wird. Das spricht nicht gegen die Analogie, sondern vor allem gegen die derzeitige Darstellung der Mechanik. Dass die Mechanik als Vorbild so ungeeignet ist, liegt daran, dass sie mit Fernwirkungen operiert. Das wollen wir natürlich nicht auf die ganze Physik übertragen.

Wenn die Mechanik als Vorbild nicht in Frage kommt, so könnte man es vielleicht mit der Wärmelehre versuchen. Wieder kommt aber etwas heraus, was man ohne zu zögern als inakzeptabel einstufen wird. Das Problem bei der Wärmelehre ist, dass man hier die zentrale und einfache Größe Entropie erst spät (wenn überhaupt) und auf sehr undurchsichtige Art einführt. Wenn wir die Elektrizitätslehre nach dem Muster der Wärmelehre aufbauen wollten, so müssten wir sie weitgehend ohne elektrische Ladung und ohne elektrische Ströme darstellen, so wie ja in der Wärmelehre Entropie und Entropieströme praktisch nicht vorkommen. Das geht zwar, bedeutet aber, dass die Elektrizitätslehre genau so unhandlich würde, wie es jetzt die Wärmelehre ist. Wie eine solche Elektrizitätslehre aussehen würde, hat Fuchs [5] in einem sehr amüsanten Aufsatz vorgeführt.

Man sieht: Bevor man ans Angleichen geht, sollte man nachsehen, ob sich überhaupt eines der vier Gebiete in einem Zustand befindet, der unserer heutigen Sicht der Naturwissenschaft entspricht. Tatsächlich kann man das von der Elektrizitätslehre sagen. Wir wollen daher den Aufbau von Mechanik, Wärmelehre und Stofflehre so einrichten, dass diese Gebiete der gegenwärtigen Elektrizitätslehre ähnlich werden. Dazu gehört nicht nur, dass wir den Ablauf des Unterrichts, also die Reihenfolge, in der Größen eingeführt und Gleichungen abgeleitet werden, aufeinander abstimmen, sondern dass wir auch ähnliche Modellvorstellungen verwenden. Dieses Angleichen der Modellvorstellungen ist es vor allem, was das Lernen dann so viel ökonomischer macht. Außerdem gewinnen aber die drei angepassten Gebiete auch einzeln an Klarheit. Man hat also einen doppelten Nutzen.

#### 4. Fehlende Größen

Wir wollen die Analogie noch in einem anderen Licht betrachten. Bekanntlich kommen einige der Größen der Tabelle 1 im Unterricht nicht oder fast nicht vor: die Entropie, der Entropiestrom und das chemische Potenzial. Tabelle 2 gibt noch mal die ersten drei Spalten von Tabelle 1 wieder, nur wurden hier Entropie und chemisches Potenzial weggelassen. Die Tabelle erinnert jetzt an das Periodensystem der Elemente gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Die Systematik war offensichtlich, und es war auch offensichtlich, dass einige Elemente noch fehlten. Es war klar, dass die Tabelle irgendwann einmal vervollständigt werden würde. Ähnlich steht es mit den Größen, die wir im Unterricht benutzen. Tabelle 2 sagt uns, dass das Lehrgebäude noch unvollständig ist. Irgendwann müssen Entropie und chemisches Potenzial in den Unterrichtskanon aufgenommen werden.

Als Physiker mag man versucht sein abzuwiegeln: Das chemische Potenzial sei ja, wie es der Name deutlich macht, eine Größe der Chemie. Hier ist aber zu entgegnen, dass die Namenswahl nicht besonders glücklich war. Das chemische Potenzial ist für so genannte physikalische Vorgänge so wichtig, wie sein enger Verwandter, die Temperatur. (Die Verwandtschaft wird besonders deutlich in der statistischen Physik.) Man stelle sich ein Physikbuch vor, in dem die Temperatur nicht vorkommt! Einen ganz ähnlichen Mangel haben unsere Physikbücher tatsächlich: Es fehlt das chemische Potenzial. Das äußert sich zum Beispiel darin, dass wir nicht in der Lage sind, die Ursache oder den Antrieb für einen Phasenübergang zu beschreiben.

<b>Mechanik</b>	$p$	$v$
<b>Elektrizitätslehre</b>	$Q$	$\varphi$
<b>Wärmelehre</b>		$T$
<b>Stofflehre</b>	$n$	

Tabelle 2: Entropie und chemisches Potenzial kommen im Unterricht nicht vor.

<b>Mechanik</b>	$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$	$P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$
<b>Elektrizitätslehre</b>	$\frac{dQ}{dt} = I$	$P = U \cdot I$
<b>Wärmelehre</b>	$\frac{dS}{dt} = I_S + \Sigma_S$	$P = T \cdot I_S$
<b>Stofflehre</b>	$\frac{dn}{dt} = I_n + \Sigma_n$	$P = \mu \cdot I_n$

Tabelle 3: Einige analoge Gleichungen

## 5. Einzelheiten der Analogie

Im Folgenden wird die Analogie in groben Zügen vorgestellt. Die wichtigsten der sich entsprechenden Größen wurden schon genannt. Im Mittelpunkt eines jeden der vier Gebiete steht die extensive oder mengenartige Größe aus Spalte 2 in Tabelle 1. Von jeder von ihnen bildet man sich leicht eine konkrete Anschauung: Jede ist ein Mengenmaß für etwas, was für die mechanischen elektrischen, thermischen bzw. chemischen Vorgänge charakteristisch ist: Der Impuls ist das, was man umgangssprachlich als Schwung oder Elan bezeichnen würde. Man kann auch sagen, der Impuls ist die „Menge an Bewegung“, die in einem Körper steckt. Newton und Descartes nannten die Größe Bewegungsmenge. Die elektrische Ladung beschreibt das, - was sich auf einer geladenen Konduktorkugel befindet und über eine Funkenstrecke in die Erde abfließt. Die Entropie ist das, was man umgangssprachlich Wärmemenge nennen würde. Ein großer und heißer Körper enthält viel Entropie, ein kleiner kalter enthält wenig. Bei der Stoffmenge sagt der Name schon recht deutlich, was sie bedeutet.

Eigentlich wäre es geschickt, die Namen der Größen entsprechend zu wählen: Bewegungsmenge, Elektrizitätsmenge, Wärmemenge und Stoffmenge. Die Ströme könnte man entsprechend benennen: Bewegungsstrom, Elektrizitätsstrom, Wärmestrom und Stoffstrom. Da wir nicht die Freiheit haben, Größen umzubenennen, bleiben wir bei den etablierten Namen.

Die Spalten 2 und 3 von Tabelle 3 enthalten Beispiele für Beziehungen zwischen den Größen. Die Gleichungen in Spalte 2 kann man als Bilanzgleichungen der entsprechenden extensiven Größen betrachten. Sie sagen uns, dass eine Änderung des Wertes der extensiven Größe in einem Raumbereich auf zwei Arten zustande kommen kann:

- durch Zu- oder Wegstrom durch die Oberfläche des Raumbereichs;
- durch Erzeugung oder Vernichtung.

Bei Größen, die einem allgemeinen Erhaltungssatz genügen, ist der Erzeugungsterm  $\Sigma$  null.

Die vier Gleichungen in Spalte 3 beschreiben Energietransporte: einen mechanischen (z. B. über eine Fahrradkette), einen elektrischen (über ein elektrisches Kabel), einen thermischen (durch „Wärmeleitung“) und einen chemischen (z. B. mit einem brennbaren Stoff). Man sieht, dass bei dieser Analogie die Energie in sich selbst übersetzt wird. Dasselbe gilt auch für die Zeit.

Einen weiteren Zusammenhang erläutern wir am Beispiel des vertrauten elektrischen Stroms. Für die Größen von Abb. 1 gilt:

$$I = \frac{U}{R}.$$

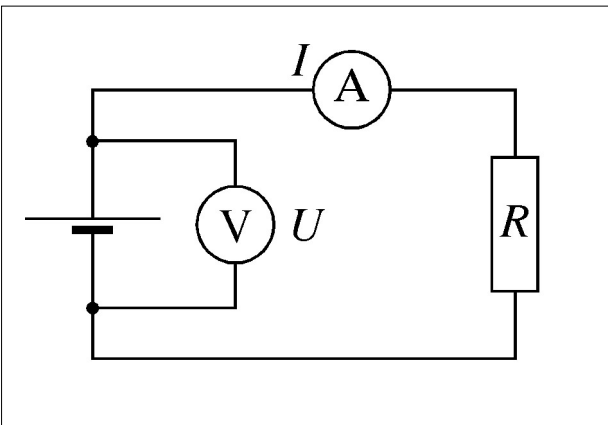


Abb. 1: Man interpretiert  $I$  als ein Maß für die Intensität eines Stroms,  $U$  als Maß für den Antrieb des Stroms und  $R$  als Maß dafür, wie stark der Strom behindert wird.

Die Gleichung sagt uns, dass man die Größe  $I$  auf zweierlei Art beeinflussen kann. Entweder man verändert den Wert der Größe  $U$ , indem man an einem Knopf des Netzgerätes dreht, oder man verändert  $R$ , die Größe, die den kastenförmigen Gegenstand charakterisiert. Man deutet nun die Gleichung auf die folgende Art: Die Größe  $I$ , die „Stromstärke“, ist ein Maß für die Intensität eines gedachten Stroms. Der „Widerstand“ genannte Gegenstand stellt ein Hindernis für den Strom da, er setzt ihm einen Widerstand entgegen. Die Größe  $R$  ist ein Maß für diesen Widerstand. Außerdem ist die Stromstärke um so größer, je größer  $U$  ist. Man interpretiert  $U$  als ein Maß für einen Antrieb des Stroms, so wie eine Druckdifferenz ein Antrieb für einen Wasserstrom ist.

Diese Interpretation hat sich in der Elektrizitätslehre sehr bewährt, und sie hat sich so etabliert, dass wir geneigt sind zu vergessen, dass es sich nur um ein Modell handelt. In der Tat: Die Aussage, es fließe ein Strom elektrischer Ladung, kann nur eine einem Modell entlehnte Sprechweise sein, denn genau genommen kann elektrische Ladung so wenig fließen wie etwa eine Masse an einer Feder hängen kann. Ladung und Masse sind Variablen, also mathematische Objekte, und als solche können sie weder fließen noch hängen.

Das Modell von der fließenden Ladung, dem Antrieb und dem Widerstand hat sich nun so gut bewährt, dass wir es auch auf die anderen, analogen Bereiche, nämlich Mechanik, Wärmelehre und Chemie übertragen wollen.

Wir kommen damit zu der folgenden Deutung von Vorgängen der Mechanik, der Wärmelehre und der Chemie.

1. Die Kraft ist ein Maß für die Stärke eines Impulsstroms.
2. Bei einem Reibungsvorgang setzt das reibende Medium dem Impulsstrom einen Widerstand entgegen, bei einem Wärmetransport setzt der Wärmeleiter dem Entropiestrom einen Wärmewiderstand entgegen, bei einem Diffusionsvorgang wird der Stoffstrom durch einen Widerstand behindert und eine chemische Reaktion oder ein Phasentübergang hat einen Reaktionswiderstand zu überwinden.
3. Der Antrieb für einen Impulsstrom ist eine Geschwindigkeitsdifferenz, für einen Entropiestrom eine Temperaturdifferenz und für einen Diffusionsvorgang oder eine chemische Reaktion eine chemische Potenzialdifferenz.

Aus dieser Interpretation ergibt sich dann eine für jedes der 4 Teilgebiete geltende einfache Regel (Tabelle 4):

Impuls geht von selbst von einem Körper höherer zu einem Körper niedrigerer Geschwindigkeit.

Elektrische Ladung fließt von selbst von einem Körper höheren zu einem Körper niedrigeren elektrischen Potenzials.

Entropie strömt von selbst vom wärmeren zum kälteren Körper.

Stoffe diffundieren von selbst von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren chemischen Potenzials. Auch chemische Reaktionen laufen in Richtung abnehmenden chemischen Potenzials.

Noch einmal zurück zur Elektrizität. Die elektrische Ladung folgt selbstständig dem elektrischen Potenzialgefälle, sie fließt den Potenzialberg hinunter. Damit sie in einem Stromkreis den Potenzialberg hinunter fließen kann, muss sie an einer anderen Stelle wieder hinaufgelangen. Das macht sie zwar nicht freiwillig, aber man kann sie unter Energieaufwand dazu zwingen. Man macht das bekanntlich mit einer Batterie, einem Generator, einem Thermoelement oder einer Solarzelle, man kann auch sagen: mit einer „Elektrizitätspumpe“.

<b>Mechanik</b>	Impuls fließt von selbst vom Körper höherer zu Körper niedrigerer Geschwindigkeit	Eine Impulspumpe (Motor) befördert den Impuls vom Körper niedrigerer zum Körper höherer Geschwindigkeit.
<b>Elektrizitätslehre</b>	Elektrische Ladung fließt von selbst vom Körper höheren zum Körper niedrigeren elektrischen Potenzials.	Eine Elektrizitätspumpe (Batterie, Generator) befördert die elektrische Ladung von Stellen niedrigerem zu Stellen höheren elektrischen Potenzials.
<b>Wärmelehre</b>	Entropie fließt von selbst vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur.	Eine Entropiepumpe (Wärmepumpe) befördert Entropie von Stellen niedrigerer zu Stellen höherer Temperatur.
<b>Stofflehre</b>	Eine Reaktion läuft von selbst vom höheren zum niedrigeren chemischen Potenzials.	Eine Reaktionspumpe (Elektrolysezelle) treibt eine Reaktion vom niedrigeren zum höheren chemischen Potenzial.

Tabelle 4: Analoge Vorgänge

Entsprechend kann man auch die anderen Ströme gegen ihre natürliche Tendenz den entsprechenden Potenzialberg hinaufzwingen (Tabelle 4): einen Impulsstrom vom langsamen zum schnellen Körper mit einer „Impulspumpe“, d. h. mit einem Motor, die Entropie von kalt nach warm mit einer „Entropiepumpe“, technisch Wärmepumpe genannt, und eine chemische Reaktion mit einer „Reaktionspumpe“. In einem der folgenden Aufsätze wird gezeigt, dass eine galvanische Zelle ein Beispiel einer solchen Reaktionspumpe ist.

## 6. Schlussbemerkungen

Es geht in diesem Heft um Themen, die sowohl im Physik- als auch im Chemieunterricht wichtig sind. Die wichtigsten Lehren aus unseren Analogiebetrachtungen sind daher:

1. Die Wärmelehre wird so gestaltet, dass die Entropie im Mittelpunkt steht. Sie beginnt mit der Entropie. Die Entropie ist ein Maß dafür, was man umgangssprachlich Wärmemenge nennen würde. Eine Temperaturdifferenz erscheint als Antrieb für einen Entropiestrom.
2. Das chemische Potenzial wird ähnlich eingeführt wie das elektrische Potenzial. Eine chemische Potenzialdifferenz wirkt als Antrieb für Diffusionsströme, für Phasenübergänge und für „chemische“ Reaktionen.

Man könnte befürchten, dass durch die Einführung von zwei neuen Größen im Unterricht der Stoffumfang zunimmt. Tatsächlich ist das Gegenteil der Fall, denn gerade dadurch, dass einem Entropie und chemisches Potenzial zur Verfügung stehen, fallen gleich mehrere Größen, die man sonst braucht, und die sich nur als Ersatzkonstruktionen für die Entropie oder für das chemische Potenzial erweisen, weg, nämlich die so genannte „Wärme“ (die schwierige Prozessgröße, mit der kaum jemand umgehen kann), außerdem die thermodynamischen Potentiale Enthalpie, freie Energie und freie Enthalpie. Ebenfalls nicht gebraucht wird das Konzept der Energieentwertung sowie die damit zusammenhängende Exergie.

## Literatur

- [1] *F. Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs, Elektrodynamik, Unterrichtshilfen, Aulis Verlag Deubner, Köln 2002, 9.
- [2] *Gerthsen, Kneser, Vogel*: Physik, Springer-Verlag, Berlin 1977, 170 f.
- [3] *H. F. Olson*: Dynamical Analogies, N. J. van Nostrand, Princeton 1958.
- [4] *S. R. de Groot*: Thermodynamik irreversibler Prozesse, Bibliographisches Institut, Mannheim 1960.
- [5] *G. Falk und W. Ruppel*: Energie und Entropie, Springer-Verlag, Berlin 1976.
- [6] *H. Fuchs*: A surrealistic tale of electricity, Am. J. Phys. 54, 907-9.